

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josipa Vuković

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan, dipl. ing. stroj.

Student:

Josipa Vuković

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Željku Bogdanu na vrlo korisnim savjetima kao i na posvećenom vremenu.

Josipa Vuković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac DS - 3A/PDS - 3A

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA | III |
| POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| SAŽETAK | VIII |
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Nuklearne elektrane – općenito | 1 |
| 1.2. Tipovi nuklearnih elektrani | 2 |
| 1.3. Nuklearne elektrane s tlakovodnim reaktorom | 4 |
| 1.4. Razlika između VVER i PWR nuklearne elektrane | 5 |
| 1.5. Princip izvedbe nuklearne elektrane tipa PWR | 6 |
| 2. NUKLEARNI GENERATOR PARE | 9 |
| 2.1. Teorijski dio proračuna | 12 |
| 2.1.1. Zagrijač napojne vode | 13 |
| 2.1.1.1. Koeficijent prijelaza topline na primarnoj strani [12] | 14 |
| 2.1.1.2. Koeficijent prijelaza topline na sekundarnoj strani [13] | 14 |
| 2.1.1.3. Protusmjerni izmjenjivač | 16 |
| 2.1.1.4. Stacionarni prolaz topline kroz cijevnu stijenku [15] | 17 |
| 2.1.2. Isparivački dio 1 i 2 | 18 |
| 2.1.2.1. Koeficijent prijelaza topline [11] | 18 |
| 2.1.2.2. Isparivač | 18 |
| 3. PRORAČUN | 20 |
| 3.1. Podaci | 20 |
| 3.2. Maseni protoci | 21 |
| 3.3. Koeficijent prijelaza topline u primarnom krugu | 22 |
| 3.4. Koeficijent prijelaza topline sekundarnog kruga u zagrijaču napojne vode | 24 |
| 3.5. Zagrijač vode | 27 |
| 3.6. Temperatura stijenke kod zagrijača vode | 30 |
| 3.7. Isparivački dio 1 | 32 |
| 3.8. Temperatura stijenke u isparivačkom dijelu 1 | 34 |
| 3.9. Isparivački dio 2 | 36 |
| 3.10. Temperatura stijenke u isparivačkom dijelu 2 | 38 |
| 3.11. Ukupna izmjenjivačka površina | 40 |
| 4. ZAKLJUČAK | 41 |
| PRILOZI | 42 |
| LITERATURA | 43 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Shematski prikaz nuklearnog postrojenja tipa PWR [1] | 1 |
| Slika 2. | Smještaj i izvedba komponenti primarnog kruga tipa PWR [7] | 5 |
| Slika 3. | Smještaj i izvedba komponenti tipa VVER [8] | 6 |
| Slika 4. | Shematski prikaz PWR nuklearne elektrane [9] | 7 |
| Slika 5. | Generator pare PWR nuklearne elektrane [10] | 9 |
| Slika 6. | Nuklearni generator pare s U-cijevima [11] | 12 |
| Slika 7. | Generator pare podijeljen na tri sekcije za termodinamički proračun | 13 |
| Slika 8. | Naizmjeničan raspored cijevi [13] | 15 |
| Slika 9. | Temperature struja kod protusmjernog izmjenjivača u slučaju da je toplija struja ujedno i jača struja [16] | 17 |
| Slika 10. | Temperaturno polje pri prolazu topline kroz jednoslojnu cijevnu stijenku [15] ... | 18 |
| Slika 11. | Temperature struja pri isparavanju [16] | 19 |
| Slika 12. | Temperature struja zagrijača napojne vode | 29 |
| Slika 13. | Temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku zagrijača vode | 32 |
| Slika 14. | Temperature struja pri isparavanju isparivačkog dijela 1 | 34 |
| Slika 15. | Temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku isparivačkog dijela 1 | 36 |
| Slika 16. | Temperature struja kod isparavanja isparivačkog dijela 2 | 38 |
| Slika 17. | Temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku za isparivački dio 2 | 40 |

POPIS TABLICA

| | | |
|------------|--|----|
| Tablica 1. | Tipični parametri rashladne vode reaktora [2] | 8 |
| Tablica 2. | Vrijednost konstante C i eksponenta m za naizmjeničan raspored cijevi [13] | 16 |
| Tablica 3. | Osnovni podaci potrebni za rješavanje zadatka | 20 |
| Tablica 4. | Dodatni podaci potrebni za proračun | 20 |
| Tablica 5. | Svojstva vode za 150 bar i 306°C [18] | 23 |
| Tablica 6. | Svojstva vode za 64 bar i 250° [18] | 24 |
| Tablica 7. | Svojstva vode za 64 bar i 264,5° [18] | 25 |
| Tablica 8. | Svojstva vode za 64 bar i 279°C [18] | 26 |
| Tablica 9. | Usporedba dobivenih podataka i onih iz različitih literatura | 41 |

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

| BROJ CRTEŽA | Naziv iz sastavnice |
|-------------|--------------------------|
| 1 | Nuklearni generator pare |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------|--------------|--|
| A_p | m^2 | Površina presjeka |
| A_0 | m^2 | Površina izmjenjivača |
| C_1 | W/K | Toplinski kapacitet slabije struje |
| C_2 | W/K | Toplinski kapacitet jače struje |
| c_p | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku |
| c_{p1} | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet slabije struje |
| c_{p2} | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet jače struje |
| D | kg/s | Maseni protok pare |
| d | m | Promjer generatora pare u zoni isparivača |
| d_u | m | Unutarnji promjer U-cijevi |
| d_v | m | Vanjski promjer U-cijevi |
| h | J/kg | Specifična entalpija |
| h_{nw} | J/kg | Specifična entalpija napojne vode |
| h_{szp} | J/kg | Specifična entalpija suhozasićene pare |
| $h_{w,iz}$ | J/kg | Specifična entalpija primarnog medija na izlazu iz generatora pare |
| $h_{w,ul}$ | J/kg | Specifična entalpija primarnog medija na ulazu u generator pare |
| k | W/(m^2 K) | Koeficijent prolaza topline |
| L | m | Duljina izmjenjivača |
| m | kg/s | Maseni protok |
| m_1 | kg/s | Maseni protok primarnog medija |
| m_2 | kg/s | Maseni protok sekundarnog medija |
| m_3 | kg/s | Maseni protok sekundarnog medija koji prolazi kroz isparivački dio 1 |
| m_{uk} | kg/s | Ukupni maseni protok |
| n | - | Broj U-cijevi |

| | | |
|--------------------|----------------------|--|
| O | - | Optočni broj |
| p | Pa | Tlak |
| p_1 | Pa | Tlak primarnog kruga |
| p_2 | Pa | Tlak sekundarnog kruga |
| P | W | Toplinska snaga |
| Q | W | Toplinski tok |
| Q_{isp1} | W | Toplinski tok isparivačkog dijela 1 |
| Q_{isp2} | W | Toplinski tok isparivačkog dijela 2 |
| Q_{zw} | W | Toplinski tok zagrijača napojne vode |
| r_u | m | Unutarnji polumjer |
| r_v | m | Vanjski polumjer |
| s_D | m | Dijagonalna udaljenost između središta dvije cijevi |
| s_L | m | Horizontalna udaljenost između središta dvije cijevi |
| s_T | m | Vertikalna udaljenost između središta dvije cijevi |
| w | m/s | Brzina |
| w_m | m/s | Brzina strujanja fluida između cijevi |
| z | - | Eksponent |
| α | W/(m ² K) | Koeficijent prijelaza topline |
| α_a | W/(m ² K) | Koeficijent prijelaza topline na unutrašnjoj površini cijevi |
| α_b | W/(m ² K) | Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj površini cijevi |
| μ | Pa s | Dinamička viskoznost |
| ϑ | °C | (Celzijeva) temperatura |
| ϑ' | °C | (Celzijeva) temperatura zasićenja |
| ϑ_m | °C | (Celzijeva) srednja temperatura |
| ϑ_{nw} | °C | (Celzijeva) temperatura napojne vode |
| ϑ_0 | °C | (Celzijeva) temperatura fluida ispred cijevi |
| ϑ_s | °C | (Celzijeva) temperatura stijenke cijevi |
| ϑ_{szp} | °C | (Celzijeva) temperatura suhozasićene pare |
| $\vartheta_{w,iz}$ | °C | (Celzijeva) temperatura primarnog medija na izlazu iz |

| | | |
|------------------------|-------------------|--|
| | | generatora pare |
| $\vartheta_{w,ul}$ | °C | (Celzijeva) temperatura primarnog medija na ulazu u generator pare |
| $\vartheta_{\infty a}$ | °C | (Celzijeva) temperatura tekućine unutar cijevi |
| $\vartheta_{\infty b}$ | °C | (Celzijeva) temperatura tekućine izvan cijevi |
| λ | W/(m K) | Toplinska provodnost |
| λ_{inco} | W/(m K) | Toplinska provodnost inconela |
| ν | m ² /s | Kinematička viskoznost |
| ρ | kg/m ³ | Gustoća |
| Nu | - | Nusseltova značajka |
| Pr | - | Prandtlova značajka |
| Pr_0 | - | Prandtlova značajka za fluid ispred cijevi |
| Pr_s | - | Prandtlova značajka za fluid temperature stijenke cijevi |
| Re | - | Reynoldsova značajka |
| π_1 | - | Bezdimenzijska temperaturna značajka |
| π_2 | - | Bezdimenzijska značajka broja prijenosnih jedinica |
| π_3 | - | Bezdimenzijska značajka omjera toplinskih kapaciteta struja |

SAŽETAK

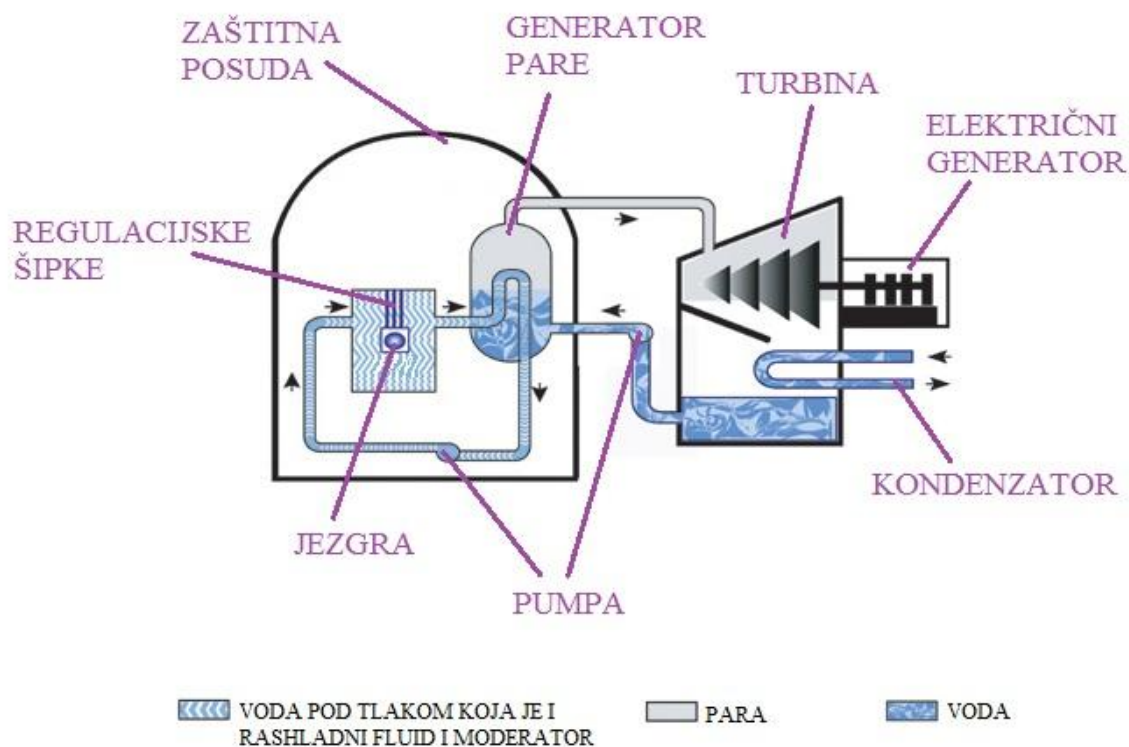
U uvodnom dijelu rada općenito se govori o nuklearnim elektranama, kako o tome što je njihov glavni zadatak, tako o usporedbi s ostalim tipovima elektrana. Također se nabrajaju tipovi nuklearnih elektrana, među kojima su i nuklearne elektrane s tlakovodnim reaktorom kojima pripada PWR i VVER tip. Nadalje se objašnjava razlika između PWR i VVER tipa nuklearne elektrane, te se posebnu pozornost pridaje principu izvedbe PWR tipa elektrane koja je zadana u zadatku rada.

U razradi rada pomno je objašnjen nuklearni generator pare PWR tipa te teorijska predznanja potrebna za njegov termodinamički proračun. U proračunskom dijelu razrađuje se termodinamički proračun generatora pare kako bi se došlo do konačnog cilja, odnosno rješenja zadatka – brojčanog podatka ukupne izmjenjivačke površine nuklearnog generatora pare PWR tipa.

1. UVOD

1.1. Nuklearne elektrane – općenito

Nuklearne elektrane su postrojenja u kojima se energija fisije atoma transformira u električnu energiju i to posredstvom toplinske energije proizvedne u nuklearnom reaktoru. Toplinska se energija u nuklearnoj elektrani iskorištava slično kao i u svakoj termoelektrani Rankineovim kružnim procesom voda-para u parnoj turbini. U tom smislu je nuklearna elektrana u osnovi termoelektrana samo što se u njoj toplinska energija ne proizvodi izgaranjem fosilnih goriva, nego fisijom atoma urana i plutonija. Na slici 1. može se vidjeti shematski prikaz nuklearnog postrojenja tipa PWR o kojemu će biti riječ kasnije u poglavljima 1.3. i 1.5.



Slika 1. Shematski prikaz nuklearnog postrojenja tipa PWR [1]

Proizvodnja toplinske energije je vezana uz povećanje temperature materijala. Gorivni elementi reaktora, u kojima se odvija proces fisije i u kojima se neposredno oslobađa toplinska energija, imaju najvišu temperaturu. Ti elementi sadrže ujedno i fisijske proizvode, a time i najveći dio radioaktivosti u postrojenju.

Prema drugom zakonu termodinamike stupanj djelovanja toplinskog ciklusa je veći što je temperatura ogrijevnog spremnika viša. Upravo je ta viša temperatura imperativ svakog termoenergetskog postrojenja, a određena je i ograničena čvrstoćom i izdržljivošću materijala. U nuklearnom postrojenju tu temperaturu ograničava mehanička čvrstoća obloga gorivnih elemenata i maksimalno dopuštena temperatura materijala nuklearnog goriva. Gubitak mehaničkih svojstava materijala nuklearnog goriva doveo bi do ispuštanja fisijskih produkata u rashladno sredstvo reaktora te posredno i u okolinu.

Iz upravo navedenog razloga, sigurnost nuklearnog postrojenja i okoline ograničavajući je faktor za temperaturu nuklearnog goriva i rashladnog sredstva u reaktoru, a posredno i za stupanj korisnog djelovanja toplinskog kružnog procesa u nuklearnoj elektrani.

Zbog toga se temperature primarnog kruga, posebno kod vodom hlađenih reaktora, drže u nuklearnoj elektrani na bitno nižim vrijednostima nego u ložištima parnih kotlova koji su kod termoelektrana ogrijevni spremnik.

Posljedica nižih temperatura je niže iskorištenje toplinskog ciklusa nuklearnih elektrani u odnosu na termoelektrane.

Kako stupanj djelovanja toplinskog ciklusa ovisi o prosječnoj temperaturi rashladnog medija u nuklearnom postrojenju, u interesu je približiti što više prosječnu i maksimalnu temperaturu rashladnog fluida, odnosno što više smanjiti porast temperature rashladnog medija u reaktoru. [2]

Toplinska snaga reaktora razmjerna je produktu brzine fluida i porasta njegove temperature. Smanjenje porasta temperature fluida je za danu snagu reaktora moguće samo ako se poveća njegova brzina. [2]

Snaga potrebna za cirkulaciju rashladnog fluida kroz reaktor je razmjerna trećoj potenciji brzine fluida. Ta je snaga ograničavajući faktor za smanjenje porasta temperature fluida kroz reaktor. Kod projektiranja postrojenja navedene parametre treba optimirati.

1.2. Tipovi nuklearnih elektrani

Specifičnost nuklearne elektrane u odnosu na klasičnu termoelektanu je u iskorištavanju reaktora kao izvora toplinske energije. Zbog toga se kod nuklearnih elektrana razlikuje primarno postrojenje, koje se odnosi na reaktor, elemente primarnog kruga i na pomoćne sustave reaktora, i sekundarno postrojenje kojemu pripada turbinsko i električno postrojenje elektrane.

Nuklearne elektrane može se podijeliti obzirom na različite tipove primarnog postrojenja jer je sekundarno postrojenje kod svih tih elektrana u osnovi isto i slično postrojenju kod klasičnih termoelektrana.

Osnovni dijelovi nuklearnih reaktora prema kojima se vrše klasifikacije [2]:

1. Nuklearno gorivo
 - Prirodni uran
 - Obogaćeni uran
 - Metalni uran
 - Oksid urana
2. Moderator
 - Obična voda
 - Teška voda
 - Grafit
3. Rashladni fluid
 - Obična voda
 - Teška voda
 - Ugljikov dioksid
 - Helij
 - Tekući metal

Najčešća klasifikacija reaktora je prema vrstama rashladnih sustava [3]:

1. Reaktori hlađeni vodom pod tlakom
 - 1.1. Hlađeni i moderirani običnom vodom (PWR¹, VVER²)
 - 1.2. Hlađeni i moderirani teškom vodom
2. Reaktori hlađeni kipućom vodom
 - 2.1. Hlađeni i moderirani kipućom običnom vodom (BWR³)
 - 2.2. Hlađeni kipućom običnom vodom i moderirani teškom vodom (SGHWR⁴)
 - 2.3. Hlađeni kipućom običnom vodom i moderirani grafitom (LWGR⁵)
3. Reaktori hlađeni plinom
 - 3.1. Hlađeni plinom i moderirani grafitom I generacije (GCR⁶)

¹ eng. Pressurized Water Reactor

² rus. Водо-водяной энергетический реактор

³ eng. Boiling Water Reactor

⁴ eng. Steam Generating Heavy Water Reactor

⁵ eng. Light Water-cooled Graphite-moderated Reactor

- 3.2. Hlađeni plinom i moderirani grafitom II generacije (AGR⁷)
- 3.3. Hlađeni plinom i moderirani grafitom s visokim temperaturama u jezgri (HTGR⁸)
- 3.4. Brzi oplodni hlađeni plinom (GBR⁹)
- 4. Reaktori hlađeni tekućim metalima
 - 4.1. Brzi oplodni hlađeni tekućim metalima (LMFBR¹⁰)

1.3. Nuklearne elektrane s tlakovodnim reaktorom

Tlakovodni reaktori upotrebljavaju običnu vodu za usporavanje neutrona. Dobra svojstva vode kao moderatora su njena raspoloživost, niska cijena i djelotvorno usporavanje neutrona. Na temelju analize svojstava moderatora, poizlazi da je sposobnost usporavanja neutrona kod vode najveća. [4]

Nedostatak vode je u relativno velikoj vrijednosti udarnog presjeka za apsorpciju termičkih neutrona u vodik, što se ogleda u maloj vrijednosti odnosa moderacije. S termodinamičkog stajališta, mana upotrebe vode je i u niskoj temperaturi vrelišta što zahtjeva primjenu visokog tlaka kako bi se spriječilo ključanje vode pri temperaturama koje još osiguravaju prihvatljiv toplinski stupanj djelovanja kružnog procesa. U tom je procesu, upravo prosječna temperatura vode u primarnom krugu temperatura ogrijevnog spremnika.

Dobra moderacija neutrona u vodi dopušta gradnju reaktora s malim volumenom moderatora u jezgri, odnosno gusto pakiranim gorivnim šipkama. Upravo gusto pakiranje gorivnih šipki dopušta da se u reaktoru postigne velika gustoća proizvedene termalne snage što znači da je moguće izgraditi tlakovodni reaktor znatne snage uz relativno malen volumen jezgre.

Niski odnos moderacije obične vode ne dopušta primjenu prirodnog urana kao nuklearnog goriva jer se u takvom reaktoru ne bi mogla postići kritičnost. Reaktori s vodom kao moderatorom moraju imati obogaćeno gorivo. Obogaćenja se kreću od 3 do 5%, to je tzv. slabo obogaćeno gorivo. [2] Nepovoljna strana upotrebe obogaćenog urana je njegova visoka cijena. Međutim, upotreba obogaćenog urana ima i značajnih prednosti, npr. mogućnost ugradnje većeg viška reaktivnosti u reaktor što dopušta da se gorivo može izmjenjivati u dužim vremenskim intervalima. Time se znatno pojednostavljuje pogon energetskog objekta.

⁶ eng. Gas Cooled Reactor

⁷ eng. Advanced Gas Reactor

⁸ eng. High Temperature Gas Reactor

⁹ eng. Gas Breeder Reactors

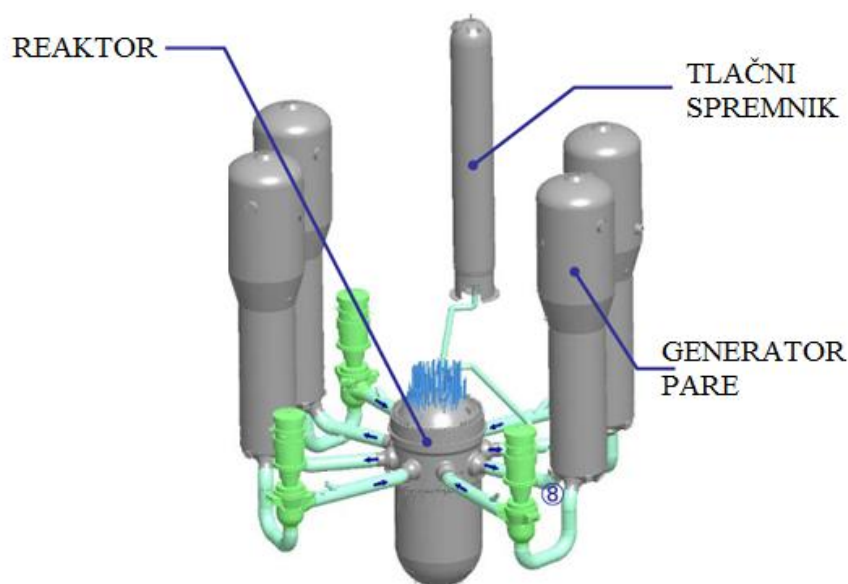
¹⁰ eng. Liquid Metal Fast Breeder Reactor

1.4. Razlika između VVER i PWR nuklearne elektrane

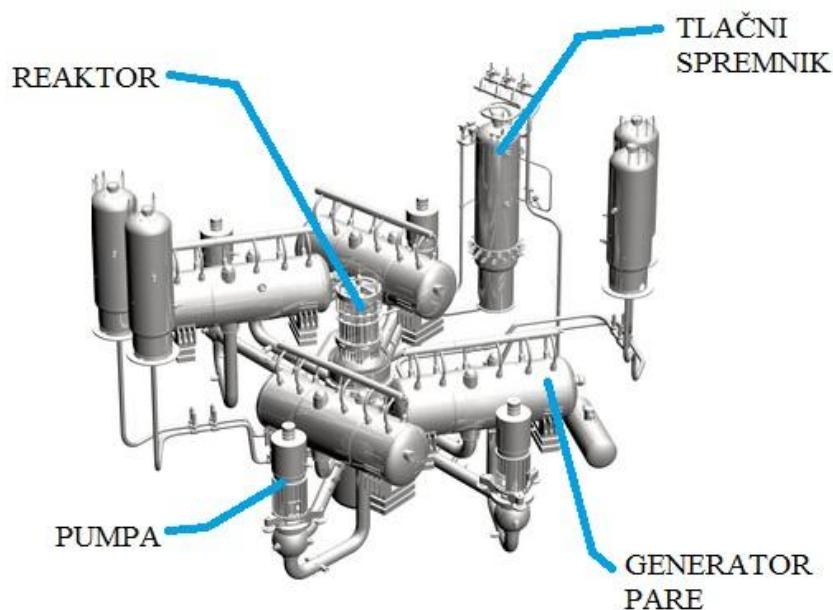
Najviše elektrana koje su danas u pogonu imaju reaktore hlađene i moderirane običnom vodom pod tlakom, poznate pod skraćenim nazivom PWR. [5] Takvi tipovi nuklearnih elektrana zapadne varijante razvijeni su u Sjedinjenim Američkim Državama, poduzeće Westinghouse, a kasnije su licence za projektiranje i izradu komponenata opreme preuzela japanska i europska poduzeća. Nakon dugog razvojnog puta tave su elektrane standardizirane, pa se grade tri veličine reaktora sa snagama na pragu elektrane u području 600-700, 900-1000 i 1200-1500 MW. [2]

Isti tip reaktora razvijen je i u bivšem Savezu Sovjetskih Socijalističkih Republika (SSSR) pod nazivom VVER. Prva nuklearna elektrana s takvim reaktorom imala je snagu na pragu od 210 MW. Daljnjim razvojem snaga je povećana na 440 MW, 1000 te 1200 MW. [6] Više takvih elektrana gradilo se u SSSR-u i istočnoeuropskim državama.

Osnovna razlika između reaktorskih postrojenja s vodom pod tlakom VVER i PWR je u smještaju i izvedbi komponenata primarnog kruga. Nuklearne elektrane PWR tipa imaju vertikalne (slika 2.), a one VVER horizontalne generatore pare (slika 3.) koji su smješteni tangencijalno oko reaktora. Smještaj horizontalnih generatora pare kod tipa VVER postrojenja zahtijeva veliki prostor i otežava smještaj komponenata primarnog kruga u sigurnosni štit.



Slika 2. Smještaj i izvedba komponenti primarnog kruga tipa PWR [7]

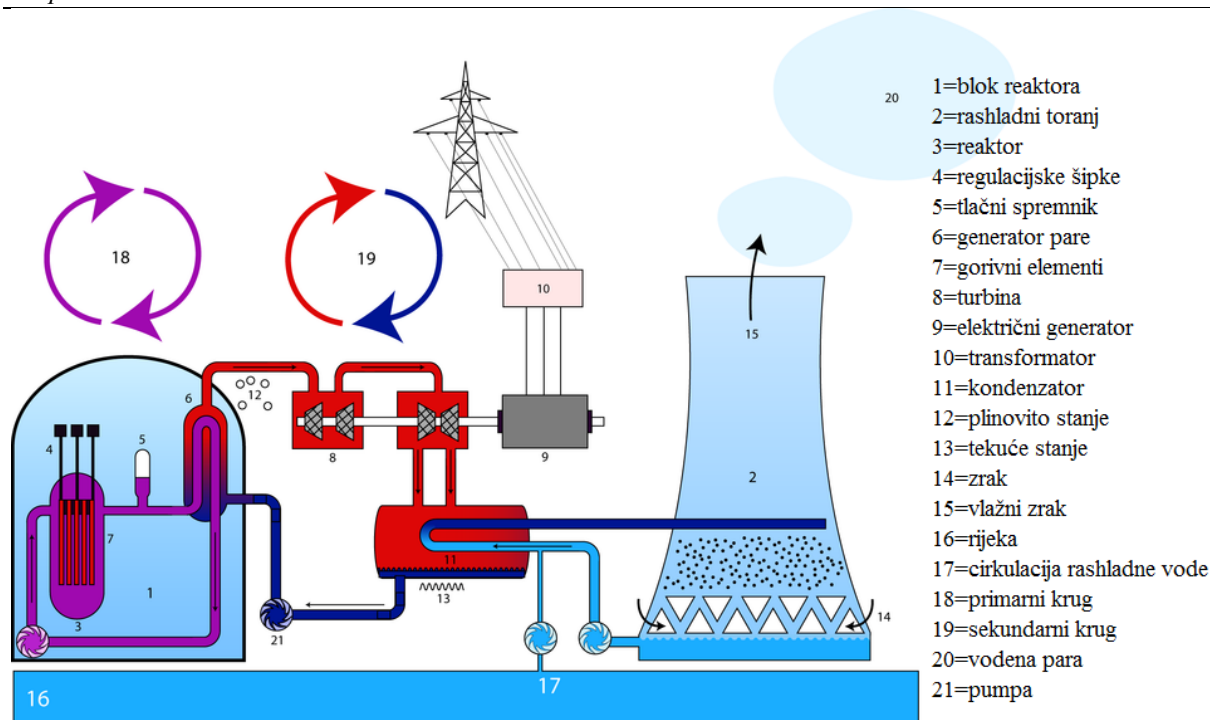


Slika 3. Smještaj i izvedba komponenti tipa VVER [8]

Prostorni raspored komponenti primarnog kruga u nuklearnoj elektrani s reaktorom tipa PWR je simetričan oko reaktora. Posuda za održavanje tlaka i kompenzaciju volumena (tlačni spremnik) zajednička je za sve primarne krugove u reaktorskom postrojenju.

1.5. Princip izvedbe nuklearne elektrane tipa PWR

Izvedba nuklearne elektrane tipa PWR zasniva se na principu dvaju odvojenih rashladnih krugova: rashladnog kruga reaktora – primarni krug i rashladnog kruga generatora pare – sekundarni krug (slika 4.).



Slika 4. Shematski prikaz PWR nuklearne elektrane [9]

Kao što je već spomenuto, nuklearne elektrane se u osnovi međusobno razlikuju po izvedbi reaktorskog postrojenja, dakle po izvedbi primarnog rashladnog kruga. Iako i sekundarni rashladni krug može imati neke specifičnosti, u pravilu se bitno ne razlikuje u odnosu na klasične termoelektrane. Zbog toga se sekundarni krug često naziva klasični ili konvencionalni dio nuklearne elektrane.

Princip PWR nuklearne elektrane je sljedeći. Izvor toplinske energije u primarnom krugu elektrane je nuklearni reaktor. Reaktor zagrijava rashladnu vodu koja cirkulira u zatvorenoj petlji sastavljenoj od generatora pare, primarne pumpe, tlačnika i primarnih cjevovoda. Pravilno funkcioniranje postrojenja uvjetovano je pothlađenjem rashladne vode reaktora, tj. njenim neisparavanjem.

Toplinski stupanj djelovanja nuklearne elektrane je funkcija prosječne temperature vode u primarnom krugu, stoga je bitno da ta temperatura bude što viša odnosno da je prosječna temperatura primarnog rashladnog fluida u reaktoru i generatoru pare približno ista.

Sljedeća tablica prikazuje tipične parametre rashladne vode reaktora.

Tablica 1. Tipični parametri rashladne vode reaktora [2]

| Parametri rashladne vode reaktora | |
|---|-------------------------|
| Tlak | 150÷160 bar |
| Prosječna temperatura | 570÷590 K |
| Promjena temperaure u reaktoru i generatoru pare | 40÷50 K |
| Protočni volumen po rashladnom krugu | oko 6 m ³ /s |

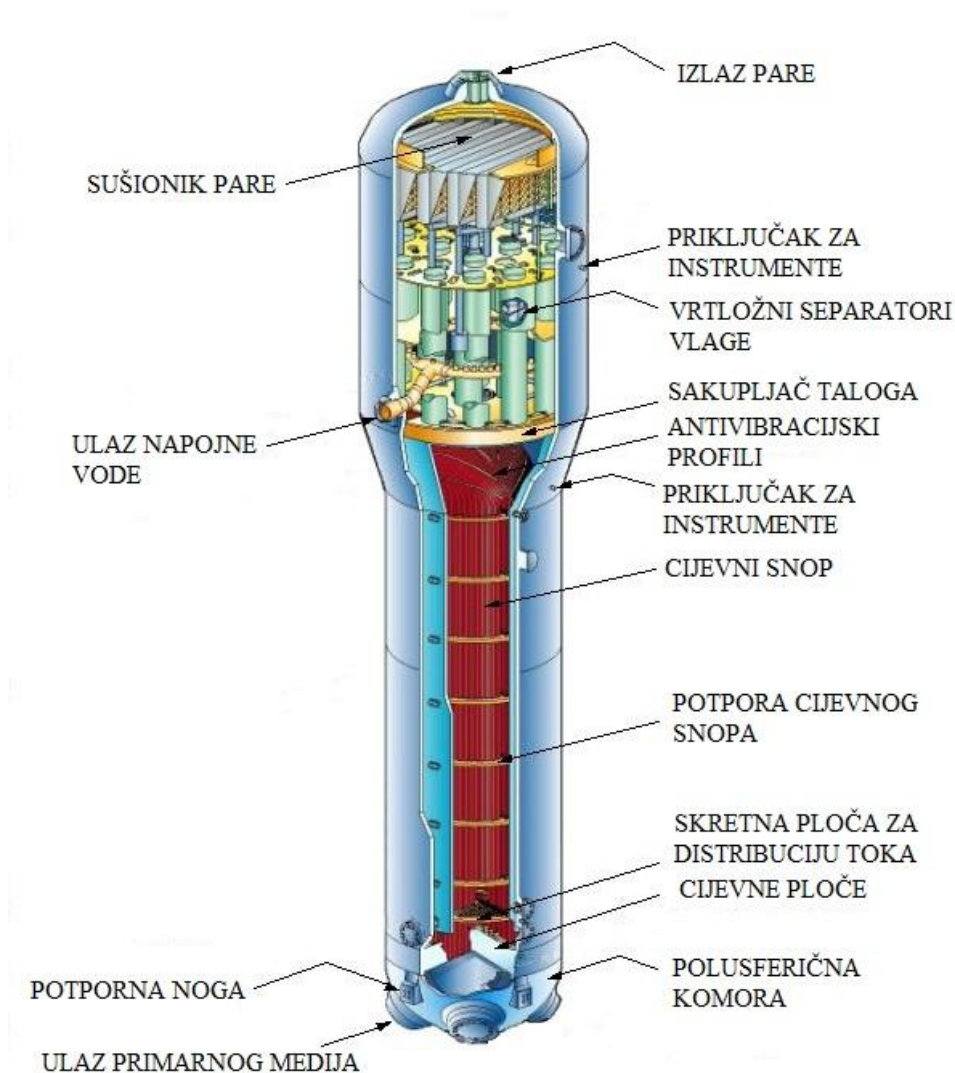
Komponente opreme u svakom rashladnom krugu su iste. Budući da su rashladni krugovi hidraulički povezani u reaktoru, potreban je samo jedan regulator tlaka tzv. tlačnik ili tlačni spremnik za sve rashladne krugove.

Komponente primarnog kruga smještaju se u veliku zaštitnu posudu, koje se prema engleskoj terminologiji često naziva kontejnment (eng. containment). Zaštitna posuda je projektirana za tlak koji bi u njoj nastao pri većem lomu komponente primarnog kruga (redovito se pretpostavlja lom jednog od primarnih cjevovoda). U takvom bi slučaju došlo do naglog pada tlaka u primarnom krugu te bi voda isparila. Para bi zajedno s dijelom radioaktivnih nuklida koji su sadržani u primarnom krugu, ispunila zaštitnu posudu i povišila u njoj tlak na 3 do 4 bar. To je upravo tlak za koji je posuda projektirana. Zaštita okoline i u takvom slučaju bi bila osigurana. Opisani se kvar tretira kao najveći projektom predviđeni kvar, u literaturi označen kao Design Basic Accident (DBA). [2]

Zaštitna posuda je kuglastog oblika jer je poznato da je taj oblik najpovoljniji za tlačne posude u pogledu naprezanja. Kuglasta zaštitna posuda kod zadane visine osigurava veći unutarnji prostor, a time i mogućnost smještaja bazena za ozračeno gorivo unutar posude. Unutarnji smještaj bazena omogućuje bolju zaštitu ozračenog goriva od vanjskih utjecaja.

2. NUKLEARNI GENERATOR PARE

Generatori pare (slika 5.) su izmjenjivači topline specijalne izvedbe kojima je zadatak toplinsku energiju nastalu u primarnom rashladnom krugu prenijeti na sekundarni rashladni krug, odnosno na radni medij u turbinskom ciklusu.



Slika 5. Generator pare PWR nuklearne elektrane [10]

U nuklearnim elektranama tipa PWR generator pare je vertikalalan, a sastoji se od dva osnovna dijela: isparivača sa cijevnim snopom i parnog prostora u kojem su separatori i sušionici pare.

Generator pare je visok oko 20 m, promjer u zoni isparivača iznosi oko 3,5 m, a u zoni separatora oko 4,5 m. Masa mu je oko 320 t.¹¹ [11]

Rashladno sredstvo iz reaktora ulazi u donji dio komore generatora pare, prolazi kroz cijevi savijene u snopu i izlazi kroz drugi dio donje komore. Ogrjevna površina jednog od tipičnih generatora pare iznosi oko 4800 m² koja je ostvarena s oko 5000 U-cijevi. Te cijevi su od Inconela promjera oko 19 mm. [11]

Napojna voda koja u generatoru pare isparuje u suhozasićenu paru ulazi u donji dio generatora pare te nastrujava na cijevni snop. Tada dio ogrijevne površine služi za predgrijavanje napojne vode odnosno postoji zagrijač napojne vode.

Plast generatora pare izrađen je od čelika, donje komore su platinirane nehrđajućim čelikom. Cijevni zid generatora pare je izveden od niskolegiranog čelika, a ploha cijevnog zida, koja je u dodiru s rashladnim redstvom reaktora, platinirana je Inconelom. Cijevi generatora pare pričvršćene su za cijevni zid uvaljivanjem i zavarivanjem. Separatori vlage su centrifugalnog tipa, smješteni iznad cijevnog snopa gdje se nalaze i sušionici pare. Oni omogućavaju da se sadržaj vlage u izlaznoj pari ograniči na veoma mali iznos. U generatoru pare, također je ugrađen i ograničitelj protoka pare čiji je zadatak sprječavanje prekomjernog isparavanja ako se ošteti parovod koji odvodi paru iz generatora pare u turbinu.

Primarni medij je obična voda pod visokim tlakom od oko 150 bar koja struji kroz U-cijevi, ulazeći prvo u polusfernu komoru na dnu generatora pare koja je pregradnom stijenkom od Inconela, podijeljena na ulazni i izlazni dio. Polusferna je komora cijevnom pločom odijeljena od zagrijačke sekcije. Cijevna ploča je čelični otkivak debljine 535 mm koja je na primarnoj strani također presvučena Inconelom. U nju je uvaljano oko 10 000 cijevi od čega zbog U-izvedbe u jednom prolazu ima samo polovica ovog broja. Cijevi su promjera 19/17 mm izrađene od Inconela, pri čemu je duljina ravnog dijela 7180 mm. Cijevni snop je ukrućen poprečnim limovima koji na sebi imaju perforacije za cijevi te otvore za protok dvofazne smjese vode i pare. Ima osam poprečnih limova za ukrućenje čiji je razmak od 1073 mm osiguran odstojnicima i učvršnim šipkama. Na toplijoj strani generatora pare primarna voda struji prema gore do U-koljena, koja su posebnim držačima osigurana od vibracija. Nakon zaokreta od 180° po hladnoj strani se spušta, prolazi kroz zagrijač napojne vode i kroz izlazni dio polusferične komore napušta generator pare.¹² [11]

¹¹ Podaci se odnose na generatore pare poduzeća Westinghouse kakav je i u NE Krško.

¹² Podaci se odnose na generatore pare NE Krško.

Unutrašnjost generatora pare podijeljena je cilindričnim plaštem promjera oko 3 m na zagrijačku sekciju u kojoj se nalazi cijevni snop i na silazni kanal prstenastog oblika. Recirkulirajuća voda u silaznom kanalu djelomično se miješa s napojnom vodom i struji prema dolje. Kroz otvor između cijevne ploče i cilindričnog plašta ulazi u izmjenjivačku sekciju strujeći poprečno na cijevni snop. Strujeći kroz prostor između cijevi, recirkulirajuća voda se prvo zagrijava do granice zasićenja. Ulazeći u zasićeno područje, stvara se smjesa vode i pare koja struji u vertikalnom smjeru prema gore. Strujanjem uz cijevni snop smjesa se dalje zagrijava pri čemu se povećava udio pare u njoj.

Odnos ukupnog protoka u cirkulacijskom krugu prema proizvedenoj pari naziva se optočni broj i može se izraziti pomoću jednadžbe (1). [11]

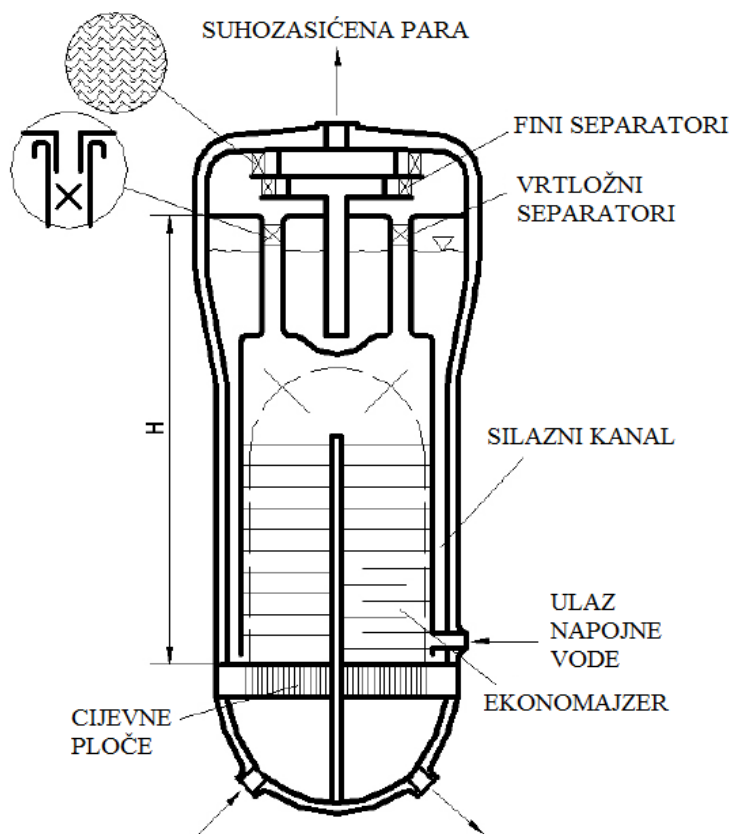
$$O = \frac{m_{uk}}{D} \quad (1)$$

U nuklearnim elektranama tipa PWR najčešće je optočni broj oko 3,5 na punoj snazi. [5]

Na vrhu zagrijačke sekcije zasićena para ulazi u sustav od 12 paralelnih vrtložnih separatora u kojima se vrši grubo odvajanje vlage. Nakon vrtložnih separatora, para ulazi u parni prostor smješten u gornjem dijelu generatora pare. U ovom dijelu smješten je sklop finih separatora visoke efikasnosti tako da u normalnim radnim uvjetima vlažnost pare na izlasku iz generatora pare je manja od 0,25%. Separacijom odvojena voda ulazi u silazni kanal kroz koji se ostvaruje recirkulacija. Do recirkulacije dolazi uslijed stvaranja uzgonske sile zbog razlike hidrostatskih tlakova na dnu silaznog kanala i na dnu zagrijačke sekcije. Razlika hidrostatskih tlakova je funkcija razlika gustoća voda u silaznom kanalu i smjese zagrijačke sekcije te visine vode u silaznom kanalu. Zbog toga je potrebno održavati razinu vode u silaznom kanalu u određenim granicama što se postiže zahvatom regulatora razine na protok napojne vode. [11]

Promjena toplinskog opterećenja generatora pare postiže se djelovanjem na ulaznu temperaturu primarne vode, zatim promjenom izlaznog tlaka pare te promjenom protoka napojne vode. Toplinski tok predan od primarne na sekundarnu stranu, proporcionalan je temperaturnoj razlici dvaju medija. Kako je na sekundarnoj strani temperatura zasićenja ovisna samo o tlaku, tako je i izmjenjena toplota ovisna o promjenama sekundarnog tlaka. Povećanjem opterećenja turboagregata, dolazi do smanjenja tlaka u parovodu čime se smanjuje temperatura sekundarne vode. Toplinski tok se povećava povećavajući proizvodnju pare. Ovim samoregulirajućim efektom pokriva se u prvom trenutku dio povećanja

opterećenja. Međutim, zbog povećanja hlađenja primarnog kruga došlo bi do snižavanja temperature primarne vode i ovaj bi se efekt vrlo brzo izgubio, kada ga ne bi slijedilo povećanje proizvodnje toplinske snaga u reaktoru, čime bi se povećala temperatura primarne vode na ulazu u generator pare i na taj način izjednačila proizvedena i iskorištena toplina.

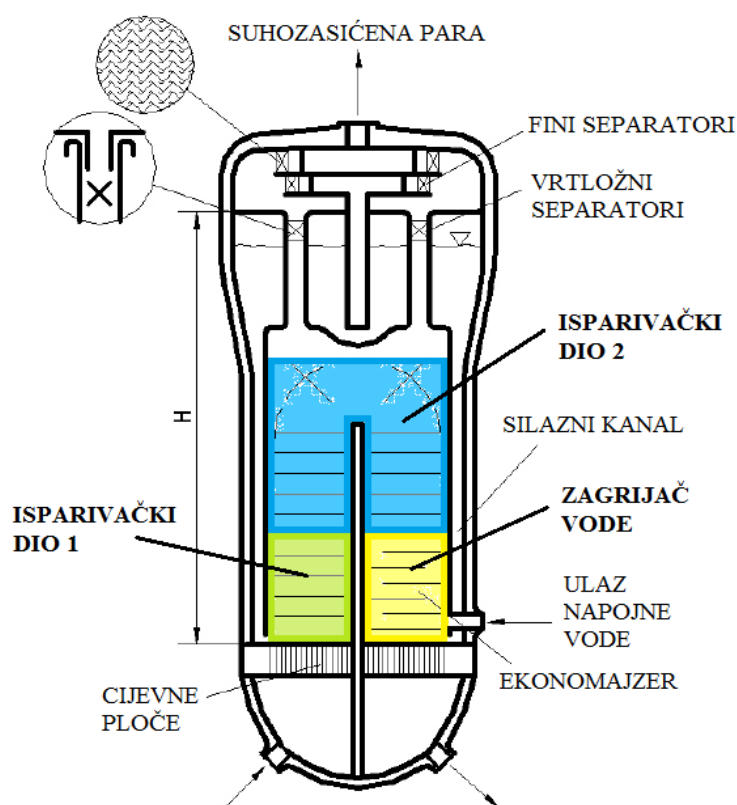


Slika 6. Nuklearni generator pare s U-cijevima [11]

2.1. Teorijski dio proračuna

Pri termodinamičkom proračunu potrebno je podijeliti generator pare na tri volumena: zagrijač napojne vode, isparivački dio 1 i isparivački dio 2 (slika 7.). Isparivački dio 1 nalazi se na toploj strani i zauzima polovicu poprečnog presjeka te seže do razine zagrijača napojne vode. Iznad te razine nalazi se isparivački dio 2 koji zauzima cijeli poprečni presjek. Za svaki od volumena postavljaju se jednačbe bilance i prijenosa topline.

Zadani podaci približno su jednaki podacima za generator pare i nuklearno postrojenje NE Krško, pa potrebni dodatni podaci za proračun upravo će se uzeti za NE Krško. Dobivene rezultate također će se moći međusobno uspoređivati.



Slika 7. Generator pare podijeljen na tri sekcije za termodinamički proračun

2.1.1. Zagrijač napojne vode

Napojna voda sekundarnog kruga uvodi se napojnim pumpama u zagrijač napojne vode koji je integralni dio generatora pare. Zagrijač vode se nalazi na hladnoj strani na visini od 435 mm iznad cijevne ploče. Funkcija mu je da se pothlađena napojna voda prolaskom kroz zagrijač zagrije na temperaturu zasićenja i tek onda pomiješa s recirkulirajućom vodom iz ostalog dijela generatora pare. Time se smanjuju temperaturne razlike između medija koji se miješaju i poboljšava stupanj toplinske iskoristivosti.

U zagrijaču vode napojna voda poprečno nastrujava na cijevni snop što je osigurano s pet odbojnih limova. Upravo zbog geometrije zagrijača napojne vode pojednostavljeno se može uzeti da se radi o protusmjernom izmjenjivaču topline.

Kako bi se izračunala duljina izmjenjivača, potrebno je izračunati koeficijent prijelaza topline na primarnoj i sekundarnoj strani.

2.1.1.1. Koeficijent prijelaza topline na primarnoj strani [12]

Za potpuno razvijeno turbulentno strujanje u cijevima može se koristiti Dittus-Böelterova jednadžba:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^z \quad (2)$$

pri čemu je $z = 0,4$ za zagrijavanje fluida, a $z = 0,3$ za hlađenje.

Jednadžba (2) vrijedi u slijedećim uvjetima:

$$0,7 \leq Pr \leq 160$$

$$10^4 < Re < 10^6$$

$$\frac{L}{d_u} \geq 10$$

Nusseltova značajka:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_u}{\lambda} \quad (3)$$

Iz jednadžbe (3) za Nusseltovu značajku i Dittus-Böelterove jednadžbe (2) dobiva se izraz za koeficijent prijelaza topline na primarnoj strani:

$$\alpha = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^z \quad (4)$$

2.1.1.2. Koeficijent prijelaza topline na sekundarnoj strani [13]

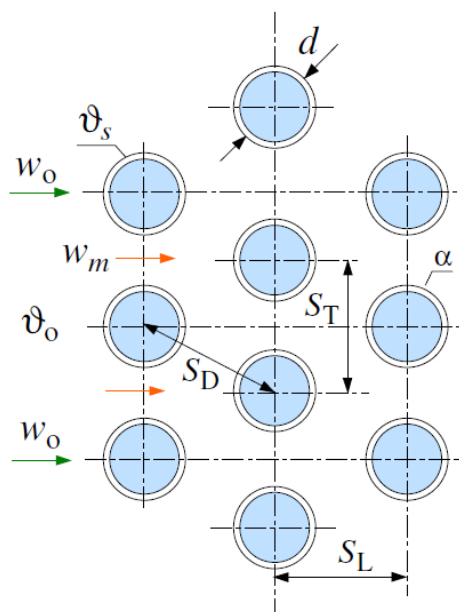
Kako u zagrijaču vode napojna voda poprečno nastružava na cijevni snop, strujanje oko cilindra je vrlo kompleksno i zbog toga teško predvidivo. Na naletnom dijelu oblikuje se laminarni oblik strujanja, dok je na stražnjem dijelu strujanje turbulentno. Zbog toga je teorijsko rješavanje prijelaza topline vrlo otežano, pa se proračuni oslanjaju na empirijske formule.

Fizikalna svojstva treba uzeti prema prosječnoj temperaturi:

$$g_m = \frac{g_s + g_0}{2} \quad (5)$$

gdje je ϑ_s temperatura stijenke cijevi, a ϑ_0 temperatura fluida ispred cijevi.

Cijevi u ovom generatoru pare poslagane su naizmjenično u tzv. trokutastom rasporedu.



Slika 8. Naizmjeničan raspored cijevi [13]

Reynoldsov broj se određuje prema brzini w_m koja ovisi o raspored cijevi:

$$\text{Re} = \frac{w_m \cdot d_v}{\nu} \quad (6)$$

Za naizmjeničan raspored važna je dijagonalna udaljenost s_D :

$$s_D = \sqrt{s_L^2 + \left(\frac{s_T}{2}\right)^2} \quad (7)$$

Kod takvog rasporeda razlikuju se dva slučaja:

- 1) Ako je: $2 \cdot (s_D - d_v) > (s_T - d_v)$, tada vrijedi jednačba (8):

$$w_m = w_0 \cdot \frac{s_T}{s_T - d_v} \quad (8)$$

- 2) Ako je: $2 \cdot (s_D - d_v) < (s_T - d_v)$, vrijedi jednačba (9):

$$w_m = w_0 \cdot \frac{s_T}{2 \cdot (s_D - d_v)} \quad (9)$$

Žukauskas je za takve slučajeve predložio novu formulu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_v}{\lambda} = C \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_0}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (10)$$

koja vrijedi uz slijedeće uvjete:

$$0,7 < Pr < 500$$

$$1 < Re < 10^6$$

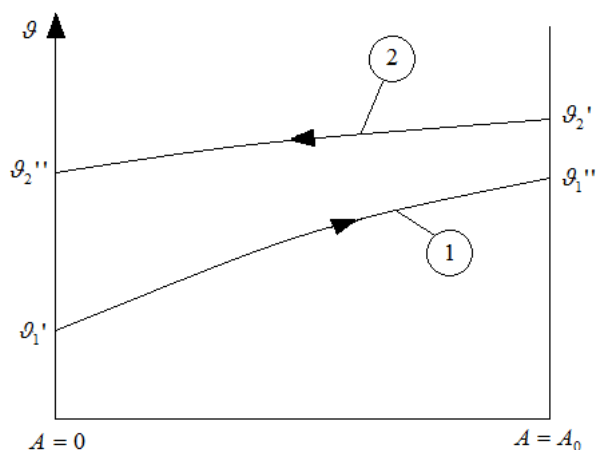
pri čemu se Re i Pr računaju za temperaturu ϑ_m , Pr_s za ϑ_s , a Pr_0 za ϑ_0 .

Tablica 2. Vrijednost konstante C i eksponenta m za naizmjeničan raspored cijevi [13]

| Područje Re | C | | m |
|---|---|-------------------------|------|
| 1 – 40 | - | | 0,4 |
| 40 – 1000 | Primijeniti proračun za jednu cijev, a ne snop cijevi | | |
| $10^3 - 2 \cdot 10^5$ | $s_T/s_L < 0,2$ | $C=0,35(s_T/s_L)^{1/5}$ | 0,6 |
| | $s_T/s_L > 0,2$ | $C=0,4$ | 0,6 |
| $2 \cdot 10^5 - 10^6$ | - | | 0,84 |

2.1.1.3. Protusmjerni izmjenjivač

U protusmjernom izmjenjivaču struje 1 i 2 ulaze na suprotnim krajevima i kroz izmjenjivač struje paralelno, ali u suprotnom smjeru.



Slika 9. Temperature struja kod protusmjernog izmjenjivača u slučaju da je toplija struja ujedno i jača struja [16]

Općenito, toplinski tok u izmjenjivaču topline računa se pomoću prosječne temperature razlike $\Delta\vartheta_m$ [14]:

$$Q = k \cdot \Delta\vartheta_m \cdot A_0 \quad (11)$$

gdje je k koeficijent prolaza topline, a A_0 površina izmjenjivača.

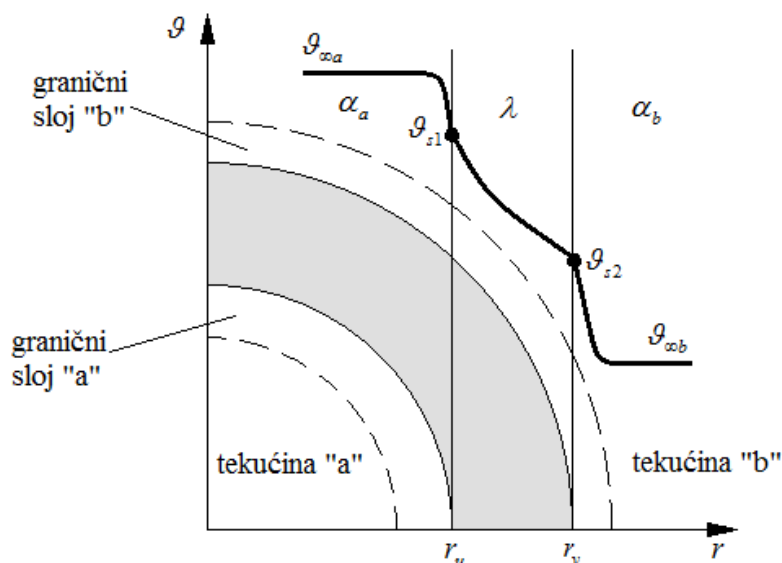
2.1.1.4. Stacionarni prolaz topline kroz cijevnu stijenku [15]

Uzimajući u obzir izmjenu topline konvekcijom na unutarnjoj površini cijevi s tekućinom u cijevi i na vanjskoj površini cijevi s tekućinom koja okružuje cijev kao i izmjenu topline kondukcijom kroz debljinu cijevi, može se pisati za jednoslojnu cijev:

$$Q = \frac{2\pi L(\vartheta_{\infty a} - \vartheta_{\infty b})}{\frac{1}{r_u \alpha_a} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{r_v \alpha_b}} \quad (12)$$

kao i:

$$Q = \frac{(\vartheta_{\infty a} - \vartheta_{s1})}{\frac{1}{2r_u \pi L \alpha_a}} = \frac{(\vartheta_{s1} - \vartheta_{s2})}{\frac{1}{2\pi \lambda L} \ln \frac{r_v}{r_u}} = \frac{(\vartheta_{s2} - \vartheta_{\infty b})}{\frac{1}{2r_v \pi L \alpha_b}} \quad (13)$$



Slika 10. Temperaturno polje pri prolazu topline kroz jednoslojnu cijevnu stijenku [15]

Upravo jednadžbe (12) i (13) će se upotrijebiti za proračun temperature vanjske stijenke cijevi koja je potrebna za izračun koeficijenta prijelaza topline, kako za zagrijač napojne vode, tako i za isparivačke dijelove 1 i 2.

2.1.2. Isparivački dio 1 i 2

2.1.2.1. Koeficijent prijelaza topline [11]

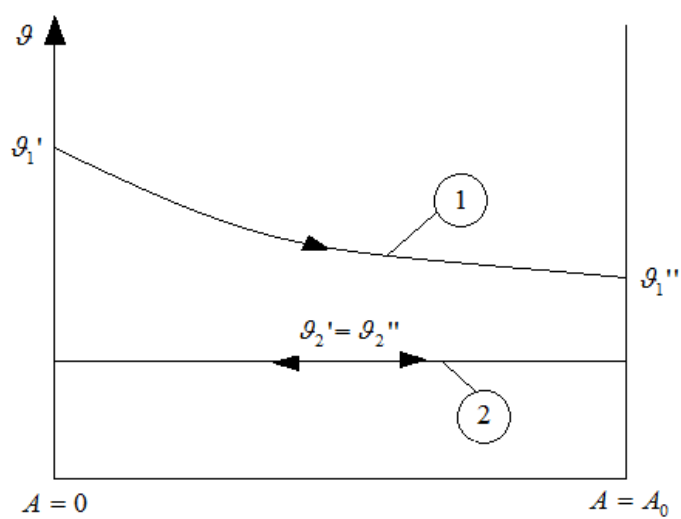
Prijelaz topline na sekundarnoj strani u isparivačkom dijelu 1 i 2 odvija se u režimu mjehuričastog vrenja. Koeficijent prijelaza topline u slučaju mjehuričastog vrenja može se izračunati prema izrazu (14):

$$\alpha = 2,2 \cdot (p^{0,14} + 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot p^2)^{3,33} \cdot (\theta_s - \theta')^{2,33} \quad (14)$$

2.1.2.2. Isparivač

U isparivačkim dijelovima voda na sekundarnoj strani isparava, odnosno mijenja svoje agregatno stanje, pa je njena temperatura jednaka duž cijele površine izmjenjivača te je njezin smjer strujanja u odnosu na onu drugu struju apsolutno nevažan. Ako struja koja mijenja

agregatno stanje isparava, očito za to toplinski tok mora dati druga struja i ona mora imati višu temperaturu.



Slika 11. Temperature struja pri isparavanju [16]

3. PRORAČUN

3.1. Podaci

Osnovni podaci potrebni za rješavanje zadatka zadani u samom zadatku, prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Osnovni podaci potrebni za rješavanje zadatka

| | | |
|--|------|-----|
| Toplinska snaga, P | 1000 | MW |
| Tlak primarnog kruga, p_1 | 150 | bar |
| Tlak sekundarnog kruga, p_2 | 64 | bar |
| Temperatura vode na ulazu, $\vartheta_{w,ul}$ | 325 | °C |
| Temperatura vode na izlazu, $\vartheta_{w,iz}$ | 287 | °C |
| Temperatura napojne vode, ϑ_{nw} | 221 | °C |

Kako zadani nuklearni generator pare, kao i nuklearna elektrana približno odgovaraju parametrima NE Krško u Sloveniji, što je već i navedeno, slijedeći podaci potrebni za proračun uzeti su približno prema njoj te su već spomenuti u drugom poglavlju (Tablica 4.).

Tablica 4. Dodatni podaci potrebni za proračun

| | | |
|---|------|----|
| Broj U-cijevi, n | 5500 | - |
| Vanjski promjer cijevi, d_v | 19 | mm |
| Unutarnji promjer cijevi, d_u | 17 | mm |
| Promjer generatora u zoni isparivača, d | 3,5 | m |

| | | |
|--|-------|---------|
| Optočni broj, O | 3,5 | - |
| Toplinska vodljivost inconela, λ_{inco} [17] | 14,86 | W/(m K) |

3.2. Maseni protoci

Napojna voda sekundarnog kruga uvodi se napojnim pumpama u zagrijač napojne vode koji je integralni dio generatora pare.

Iz zadane temperature napojne vode na ulazu u zagrijač $\vartheta_{nw} = 221^\circ\text{C}$ i pripadajućeg tlaka $p_2 = 64\text{bar}$ očitavamo iz toplinskih tablica vrijednost entalpije:

$$h_{nw} = 950,2226\text{kJ/kg}.$$

Funkcija zagrijača napojne vode je da se pothlađena voda prolaskom kroz zagrijač zagrije na temperaturu zasićenja i tek onda pomiješa s recirkulirajućom vodom iz ostalog dijela generatora pare. Time se smanjuju temperaturne razlike između medija koji se miješaju što poboljšava stupanj toplinske iskoristivosti.

Temperatura napojne vode na izlazu iz zagrijača je temperatura zasićenja za pripadajući tlak sekundarnog kruga $p_2 = 64\text{bar}$ te iznosi:

$$\vartheta_{szp} = 279,6466^\circ\text{C},$$

a entalpija suhozasićene pare onda je (očitano iz toplinskih tablica):

$$h_{szp} = 2780,3876\text{kJ/kg}.$$

Iz poznate temperature vode na ulazu u generator pare $\vartheta_{w,ul} = 325^\circ\text{C}$ i pripadajućeg tlaka primarnog kruga $p_1 = 150\text{bar}$, entalpija iznosi:

$$h_{w,ul} = 1488,956\text{kJ/kg},$$

a iz poznate temperature vode na izlazu iz generatora pare $\vartheta_{w,iz} = 287^\circ\text{C}$ i tlaka $p_1 = 150\text{bar}$, entalpija na izlazu iz U-cijevi iznosi:

$$h_{w,iz} = 1271,3725\text{kJ/kg}$$

Iz jednadžbe (15):

$$P = m_1 \cdot (h_{w,iz} - h_{w,ul}) \quad (15)$$

Uz poznatu toplinsku snagu generatora pare $P = 1000 \text{ MW}$ i prethodno izračunate entalpije na ulazu i izlazu iz U-cijevi, maseni protok primarnog medija iznosi:

$$m_1 = 4595,9363 \text{ kg/s}^{13}.$$

Iz prethodno izračunate entalpije napojne vode na ulazu u zagrijač napojne vode i entalpije suhozasićene pare na izlazu iz zagrijača, može se izračunati maseni protok napojne vode kroz zagrijač. Kako je toplota koja je predana napojnoj vodi jednaka toplini koju predaje primarni medij, maseni protok napojne vode kroz zagrijač je:

$$m_2 = \frac{P}{h_{szp} - h_{nw}} \quad (16)$$

$$m_2 = 546,3988 \text{ kg/s}$$

To je ujedno i maseni protok pare na izlasku iz generatora pare, jer u njega ulazi napojna voda, a izlazi suhozasićena para uz zadanu toplinsku snagu P .

3.3. Koeficijent prijelaza topline u primarnom krugu

Za izračun koeficijenta prijelaza topline u primarnom krugu, potrebno je odrediti površinu, odnosno presjek kroz koji struji primarni medij u U-cijevi. Ta površina iznosi:

$$A_{p,1} = \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} \quad (17)$$

$$A_{p,1} = 2,2698 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Brzina primarnog medija kroz U-cijev može se izračunati iz jednadžbe (18):

$$w_1 = \frac{m_1}{\rho_1 \cdot A_{p,1} \cdot n} \quad (18)$$

¹³ Izračunati maseni protok se odnosi za jedan generator pare, što znači da ukupni maseni protok se dobije ako izračunati udvostručimo. Daljnji proračun odnosi se na jedan generator pare.

gdje su iz toplinskih tablica očitana svojstva (Tablica 5.) za tlak $p_1 = 150 \text{ bar}$ i srednju temperaturu vode:

$$\vartheta_{m,1} = \frac{\vartheta_{w,ul} + \vartheta_{w,iz}}{2}$$

$$\vartheta_{m,1} = 306^\circ\text{C}$$

Tablica 5. Svojstva vode za 150 bar i 306°C [18]

| Svojstva vode za 150 bar i 306°C | | |
|----------------------------------|-------------------|-----------|
| ρ_1 | kg/m ³ | 712,6807 |
| μ_1 | Pa s | 8,597E-05 |
| $c_{p,1}$ | kJ/(kg K) | 5,64079 |
| λ_1 | W/(m K) | 0,54975 |

Uz broj U-cijevi $n = 5500$, brzina primarnog medija iznosi:

$$w_1 = 5,1657 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho_1 \cdot w_1 \cdot d_u}{\mu_1} \quad (19)$$

$$\text{Re}_1 = 728007,73$$

Prandtlov broj iznosi:

$$\text{Pr}_1 = \frac{\mu_1 \cdot c_{p,1}}{\lambda_1} \quad (20)$$

$$\text{Pr}_1 = 0,882078$$

Pomoću Dittus-Böelterove jedandžbe (4) koeficijent prijelaza topline na primarnoj strani je:

$$\alpha_1 = 35059,77 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

3.4. Koeficijent prijelaza topline sekundarnog kruga u zagrijaču napojne vode

Volumen kroz koji protječe napojna voda je polovica valjka umanjena za volumen U-cijevi koji siječe taj obujam. Pa je poprečni presjek strujanja napojne vode:

$$A_{p,2} = \frac{d^2 \cdot \pi}{2} - A_{p,3} \cdot n \quad (21)$$

$$A_{p,3} = \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} \quad (22)$$

gdje je d poprečni presjek generatora pare u zoni isparivača i iznosi 3,5 m.

$$A_{p,2} = 3,2511 \text{ m}^2$$

Brzina strujanja napojne vode kroz zagrijač:

$$w_2 = \frac{m_2}{\rho_2 \cdot A_{p,2}} \quad (23)$$

Svojstva vode za $p_2 = 64 \text{ bar}$ i $g_0 = \frac{g_{szp} + g_{nw}}{2} \cong 250^\circ \text{C}$ prikazana su u tablici 7.

Tablica 6. Svojstva vode za 64 bar i 250° [18]

| Svojstva vode za 64 bar i 250°C | | |
|---------------------------------|-------------------|------------|
| ρ_0 | kg/m ³ | 801,6873 |
| μ_0 | Pa s | 1,0679E-04 |
| $c_{p,0}$ | kJ/(kg K) | 4,8327 |
| λ_0 | W/(m K) | 0,62428 |
| v_0 | m ² /s | 1,3E-07 |

Svojstva napojne vode za $p_2 = 64\text{bar}$ i $\vartheta_{m,2} = \frac{\vartheta_s + \vartheta_0}{2} \cong 264,5^\circ\text{C}$ prikazana su u tablici 6.

Tablica 7. Svojstva vode za 64 bar i 264,5° [18]

| Svojstva vode za 64 bar i 264,5°C | | |
|-----------------------------------|-------------------|------------|
| ρ_2 | kg/m ³ | 778,3053 |
| μ_2 | Pa s | 1,0018E-04 |
| $c_{p,2}$ | kJ/(kg K) | 5,014768 |
| λ_2 | W/(m K) | 0,60542 |
| ν_2 | m ² /s | 1,3E-07 |

Brzina strujanja napojne vode kroz zagrijač vode je:

$$w_2 = 0,209636\text{m/s}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$\text{Re}_2 = \frac{w_2 \cdot d_v}{\nu_2} \quad (24)$$

$$\text{Re}_2 = 30948,67$$

Prandtllov broj iznosi:

$$\text{Pr}_2 = \frac{\mu_2 \cdot c_{p,2}}{\lambda_2} \quad (25)$$

$$\text{Pr}_2 = 0,829786$$

Prandtllov broj za temperaturu ϑ_0 :

$$\text{Pr}_0 = 0,826693$$

Svojstva vode za tlak $p_2 = 64\text{bar}$ i temperaturu stijenke $\vartheta_s = 279^\circ\text{C}$ prikazana su u tablici 8.

Temperatura stijenke ϑ_s dobivena je iterativnim putem koji je prikazan u poglavlju 3.6.

Tablica 8. Svojstva vode za 64 bar i 279°C [18]

| Svojstva vode za 64 bar i 279°C | | |
|---------------------------------|-------------------|----------|
| ρ_s | kg/m ³ | 752,1743 |
| μ_s | Pa s | 9,39E-05 |
| $c_{p,s}$ | kJ/(kg K) | 5,26544 |
| λ_s | W/(m K) | 0,58283 |
| ν_s | m ² /s | 1,25E-07 |

Prandtlov broj za temperaturu ϑ_s :

$$Pr_s = 0,848534$$

Prema Žukauskasovoj jednadžbi (10) Nusseltov broj iznosi:

$$Nu_2 = 184,7578$$

Gdje su vrijednosti konstante C i eksponenta m ovisni o rasporedu cijevi.

Kako je već prikazano u poglavlju 2.1.1.2. te na slici 8., radi se o naizmjeničnom tzv. trokutastom rasporedu cijevi.

Podaci potrebni za odabir vrijednosti konstante C i eksponenta m su:

$$s_L = 26,194mm^{14}$$

$$s_T = 22,685mm^{15}$$

iz čega slijedi prema jednadžbi za dijagonalu (7):

$$s_D = 26,194mm$$

Kako vrijedi da je $s_T / s_L > 0,2$ onda je iz tablice 2. $C=0,4$, a $m=0,6$.

Prijelaz topline na sekundarnoj strani odvija se u režimu prisilne konvekcije jednofazne tekućine u zagrijaču napojne vode, koeficijent prijelaza topline iznosi:

¹⁴ Udaljenost vidljiva na slici 8.

¹⁵ Udaljenost vidljiva na slici 8.

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_0}{d_v} \quad (26)$$

$$\alpha_2 = 5887,1593 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$$

3.5. Zagrijač vode

Koeficijent prolaza topline u zagrijaču napojne vode za odabranu unutarnju površinu cijevi iznosi:

$$k_{zw} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{r_u}{\lambda_{inco}} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{r_u}{r_v \cdot \alpha_2}} \quad (27)$$

$$k_{zw} = 4096,2544 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Toplinski kapacitet slabije struje, odnosno struje u sekundarnom krugu je:

$$C_1 = m_2 \cdot c_{p1} \quad (28)$$

gdje je specifični toplinski kapacitet slabije struje očitao za $p_2 = 64 \text{ bar}$ i

$$g_{m,3} = \frac{g_{szp} + g_{nw}}{2} \cong 250^\circ \text{C} \text{ iznosi } c_{p1} = 4,8327 \text{ kJ / (kgK)}.$$

$$C_1 = 2640,587 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet jače struje, odnosno struje koja teče primarnim krugom iznosi:

$$C_2 = m_1 \cdot c_{p2} \quad (29)$$

$$C_2 = 24155,3221 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

gdje je specifični toplinski kapacitet jače struje očitao za $p_1 = 150 \text{ bar}$ i

$$g_{m,3} = \frac{g_w' + g_{w,iz}}{2} = 290^\circ \text{C} \text{ iznosi } c_{p2} = 5,2558 \text{ kJ / (kgK)}.$$

Zagrijač vode se upravo zbog svoje geometrije može smatrati protusmjernim izmjenjivačem topline.

$$\Delta \vartheta_1 = \vartheta_{szp} - \vartheta_{nw} \quad (30)$$

$$\Delta \vartheta_1 = 58,6466^\circ\text{C}$$

Kako je ukupno izmjenjeni toplinski tok u protusmjernom izmjenjivaču:

$$Q = C_1 \cdot \Delta \vartheta_1 = C_2 \cdot \Delta \vartheta_2 \quad (31)$$

Slijedi:

$$\Delta \vartheta_2 = \frac{C_1 \cdot \Delta \vartheta_1}{C_2}$$

$$\Delta \vartheta_2 = 6,4111^\circ\text{C}$$

Izmjenjeni toplinski tok u zagrijaču napojne vode:

$$Q_{zw} = 154861,56 \text{ kW}$$

Ako je:

$$\Delta \vartheta_2 = \vartheta_w' - \vartheta_{w,iz} \quad (32)$$

onda je temperatura primarnog medija na ulasku u protusmjerni izmjenjivač:

$$\vartheta_w' = 293,4111^\circ\text{C}$$

Toplinski tok u izmjenjivaču izračuna se pomoću prosječne logaritamske temperaturne razlike:

$$Q_{zw} = k \cdot \Delta t_m \cdot A_{0,zw} \quad (33)$$

Prosječna logaritamska temperaturna razlika iznosi:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln\left(\frac{\Delta T'}{\Delta T''}\right)} \quad (34)$$

Pri čemu je:

$$\Delta T' = \vartheta_w' - \vartheta_{szp} \quad (35)$$

$$\Delta T'' = \vartheta_{w,iz} - \vartheta_{nw} \quad (36)$$

$$\Delta T' = 13,7644^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T'' = 66^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m = 33,3227^{\circ}\text{C}$$

Iz jednadžbe (33) površina izmjenjivača iznosi:

$$A_{0,zw} = 1134,53\text{m}^2$$

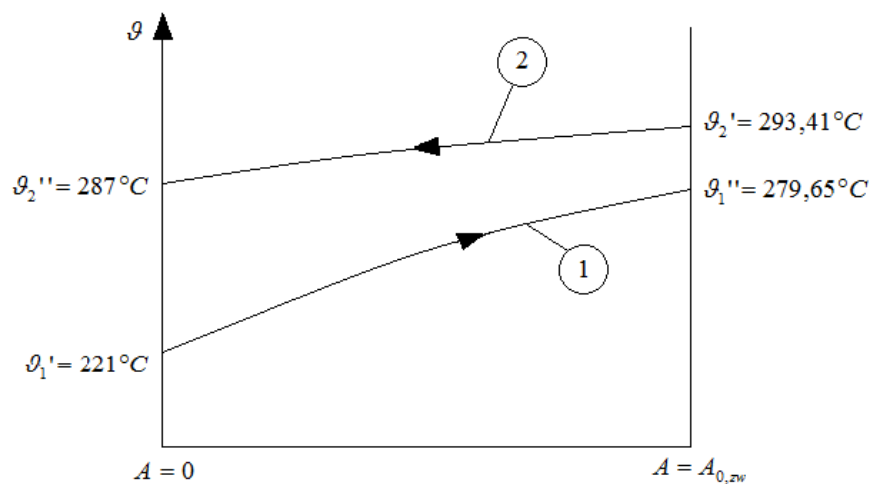
Kako je površina izmjenjivača:

$$A_{0,zw} = 2 \cdot r_u \cdot \pi \cdot n \cdot L \quad (37)$$

Duljina protusmjernog izmjenjivača, odnosno zagrijača vode iznosi:

$$L = 3,8624\text{m}$$

Na slici 12. su prikazane temperature struja protusmjernog izmjenjivača topline, odnosno zagrijača napojne vode.



Slika 12. Temperature struja zagrijača napojne vode

3.6. Temperatura stijenke kod zagrijača vode

Kako bi se izračunala temperatura stijenke potrebna za proračun koeficijenta prijelaza topline, potrebno je uzeti u obzir i izmjenu topline konvekcijom na unutarnjoj površini cijevi s vodom u cijevi i na vanjskoj površini s vodom koja okružuje cijevi, kao i izmjenu topline kondukcijom kroz debljinu cijevi.

Za jednoslojnu cijev vrijede prethodno napisane jednadžbe (12) i (13).

Pojednostavljeno, zagrijač napojne vode se smatra protusmjernim izmjenjivačem topline, stoga kako bi se izračunale temperature vode izvan i unutar cijevi, uzet će se temperature na sredini izmjenjivača.

Temperature na ulazu i izlazu iz protusmjernog izmjenjivača su:

$$\begin{aligned}\vartheta_1' &= \vartheta_{nw} = 221^\circ\text{C} \\ \vartheta_1'' &= \vartheta_{szp} = 279,65^\circ\text{C} \\ \vartheta_2' &= \vartheta_w' = 293,41^\circ\text{C} \\ \vartheta_2'' &= \vartheta_{w,iz} = 287^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Bezdimenzijska značajka π_3 je:

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} \quad (38)$$

$$\pi_3 = 0,109317$$

Za polovinu duljine izmjenjivača površina izmjene topline je:

$$A_{0,zw}^* = 2 \cdot r_u \cdot \pi \cdot n \cdot L / 2 \quad (39)$$

$$A_{0,zw}^* = 564,3508\text{m}^2$$

Slijedi, bezdimenzijska značajka π_2^* je:

$$\pi_2^* = \frac{k_{zw} \cdot A_{0,zw}^*}{C_1} \quad (40)$$

$$\pi_2^* = 0,87998$$

Bezdimenzijska značajka π_1^* je:

$$\pi_1^* = \frac{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_2^*}}{1 - \pi_3 \cdot e^{-(1-\pi_3)\pi_2^*}} \quad (41)$$

Iz jednadžbe (42):

$$\frac{\vartheta_1' - \vartheta_2''}{\vartheta_1' - \vartheta_2'^*} = 1 - \pi_1^* \pi_3 \quad (42)$$

Slijedi:

$$\vartheta_2'^* = 291,4^\circ\text{C}$$

Iz jednadžbe (43):

$$\pi_1^* = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_1''^*}{\vartheta_1' - \vartheta_2'^*} \quad (43)$$

Slijedi:

$$\vartheta_1''^* = 261,26^\circ\text{C}$$

Toplina izmjenjena konvekcijom i kondukcijom do polovine duljine izmjenjivača:

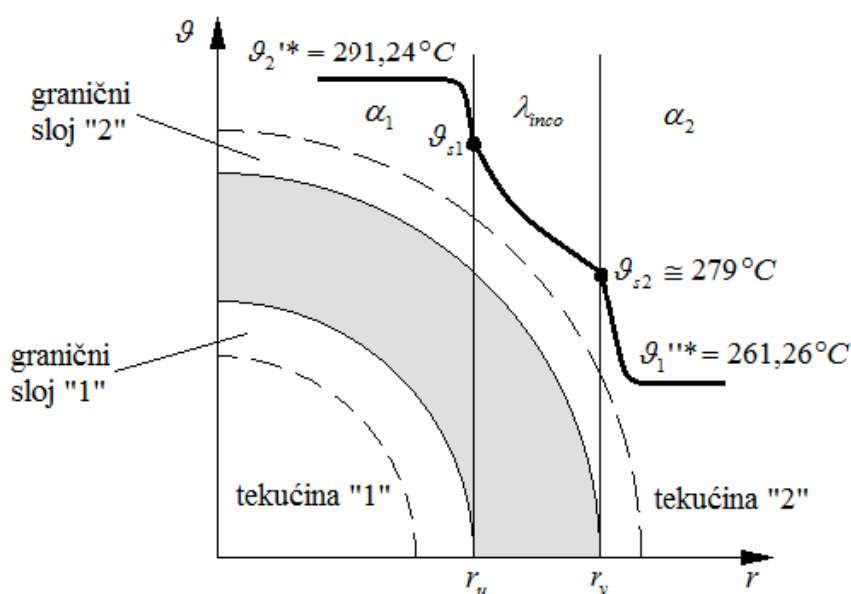
$$Q = \frac{2\pi L / 2(\vartheta_2'^* - \vartheta_1''^*)}{\frac{1}{r_u \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_{inco}} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{r_v \alpha_2}} \quad (44)$$

$$Q = 12733,91\text{W}$$

Iz jednadžbe (13) slijedi temperatura stijenke:

$$\vartheta_{s,2} \cong 279^\circ\text{C}$$

Na slici 13. je prikazano temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku zagrijača vode.



Slika 13. Temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku zagrijača vode

3.7. Isparivački dio 1

Kako voda u generatoru pare recirkulira, iz optočnog broja izračuna se ukupni maseni protok u cirkulacijskom krugu, odnosno maseni protok vode koja prolazi kroz tzv. isparivački dio 1.

$$m_3 = m_2 \cdot O \quad (45)$$

gdje je optočni broj $O = 3,5$.

$$m_3 = 1912,3959 \text{ kg/s}$$

Voda koja recirkulira je vrela kapljevina. Kada vrela kapljevina uđe u isparivački dio 1 dolazi do stvaranja mjehurića odnosno tzv. mjehuričastog vrenja.

Iz toplinskih tablica očitava se temperatura zasićenja i pripadajuća entalpija vrele kapljevine:

$$\theta_3 = 279,6466^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 1236,1354 \text{ kJ/kg}$$

Isparivački dio 1 je izmjenjivač topline, odnosno isparivač jer struja koja mjenja agregatno stanje isparava.

$$\vartheta_1' = \vartheta_{w,ul} = 325^\circ\text{C}$$

U režimu mjehuričastog vrenja koeficijent prijelaza topline na sekundarnoj strani se dobiva iz jednadžbe (14).

Pri čemu je $\vartheta_{s,2} = 292,58^\circ\text{C}$ temperatura stijenke dobivena iterativnim postupkom u poglavlju 3.8.

Toplinski kapacitet primarnog medija iznosi:

$$C_1 = m_1 \cdot c_{p1} \quad (46)$$

gdje je specifični toplinski kapacitet primarne struje očitao za $p_1 = 150\text{bar}$ i

$$\vartheta_{m,4} = \frac{\vartheta_{w,ul} + \vartheta_1''}{2} \cong 319^\circ\text{C} \text{ te iznosi } c_{p1} = 6,0874\text{kJ}/(\text{kgK}).$$

$$C_1 = 27977,4865\text{kW}/\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline je:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{r_u}{\lambda_{inco}} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{r_u}{r_v \cdot \alpha_3}} \quad (47)$$

$$k_1 = 7192,32\text{W}/(\text{mK})$$

Unutarnja površina izmjenjivača topline, odnosno isparivača:

$$A_{0,1} = 2 \cdot r_u \cdot \pi \cdot n \cdot L \quad (48)$$

$$A_{0,1} = 1134,53\text{m}^2$$

Bezdimenzijske veličine isparivača π_1 i π_2 :

$$\pi_2 = \frac{k_1 \cdot A_{0,1}}{C_1} \quad (49)$$

$$\pi_2 = 0,29166$$

$$\pi_1 = 1 - e^{-\pi_2} \quad (50)$$

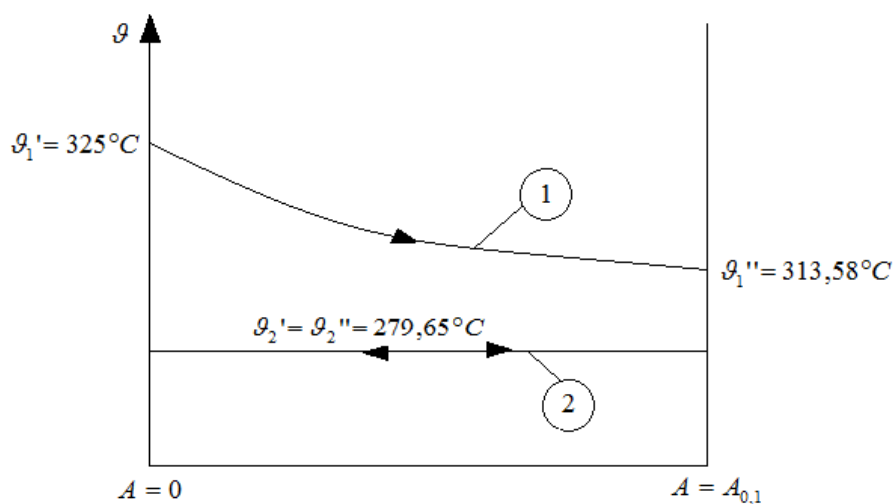
$$\pi_1 = 0,252977$$

Iz formule:

$$\pi_1 = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_1''}{\vartheta_1' - \vartheta'} \quad (51)$$

$$\vartheta_1'' = 313,53^\circ\text{C}$$

Na slici 14. su prikazane temperature struja pri isparavanju isparivačkog dijela 1.



Slika 14. Temperature struja pri isparavanju isparivačkog dijela 1

Izmjenjeni toplinski tok u isparivaču je:

$$Q_{isp1} = C_1 \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_1'') \quad (52)$$

$$Q_{isp1} = 320996,2595 \text{ kW}$$

3.8. Temperatura stijenke u isparivačkom dijelu 1

Kao i za zagrijač napojne vode, tako i za isparivački dio 1 potrebno je za proračun koeficijenta prijelaza topline izračunati temperaturu stijenke cijevi. Za razliku od zagrijača vode koji je protusmjerni izmjenjivač topline, isparivački dio 1 se smatra isparivačem.

Također će se gotovo istim putem kao i zagrijač napojne vode doći do željene temperature stijenke.

Temperature na ulazu i izlazu iz isparivača:

$$\vartheta_1' = \vartheta_{w,ul} = 325^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_1'' = 313,58^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_2' = \vartheta_2'' = \vartheta_3 = 279,65^\circ\text{C}$$

Temperature tekućine, odnosno vode izvan i unutar cijevi, proračunat će se za polovinu duljine isparivača, pa slijedi površina izmjene topline:

$$A_{0,1}^* = 2 \cdot r_u \cdot \pi \cdot n \cdot L / 2 \quad (53)$$

$$A_{0,1}^* = 564,3508\text{m}^2$$

Bezdimenzijska značajka π_2^* je:

$$\pi_2^* = \frac{k_1 \cdot A_{0,1}^*}{C_1} \quad (54)$$

$$\pi_2^* = 0,168037$$

Iz toga slijedi bezdimenzijska značajka π_1^* za isparivač:

$$\pi_1^* = 1 - e^{-\pi_2^*} \quad (55)$$

$$\pi_1^* = 0,154678$$

Iz jednadžbe (56):

$$\pi_1^* = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_1''^*}{\vartheta_1' - \vartheta_2'} \quad (56)$$

Slijedi:

$$\vartheta_1''^* = 317,98^\circ\text{C}$$

Toplina izmjenjena konvekcijom i kondukcijom do polovine duljine isparivača:

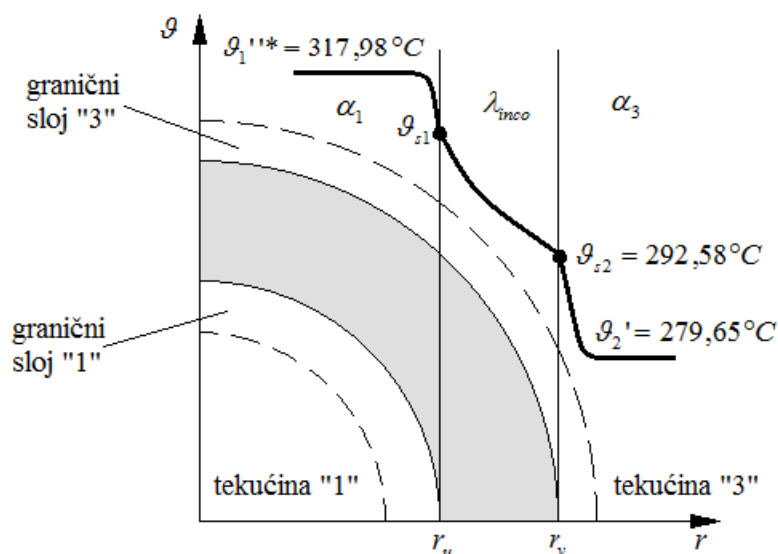
$$Q = \frac{2\pi L / 2(\vartheta_1''^* - \vartheta_2')}{\frac{1}{r_u \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_{inco}} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{r_v \alpha_3}} \quad (57)$$

$$Q = 28293,54W$$

Iz jednadžbe (13) slijedi temperatura stijenke:

$$\vartheta_{s,2} = 292,58^{\circ}C$$

Na slici 15. je prikazano temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku isparivačkog dijela 1.



Slika 15. Temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku isparivačkog dijela 1

3.9. Isparivački dio 2

Izmjenjeni toplinski tok u isparivačkom dijelu 2 je ukupno izmjenjeni toplinski tok P umanjen za izmjenjeni toplinski tok u isparivačkom dijelu 1 i zagrijaču napojne vode:

$$Q_{isp2} = P - Q_{isp1} - Q_{zw} \quad (58)$$

$$Q_{isp2} = 524142,1835kW$$

Kako isparivački dio 2 je također izmjenjivač topline odnosno isparivač, slijedi:

$$\vartheta_1' = 313,53^{\circ}C$$

$$\vartheta_1'' = 293,41^{\circ}C$$

Izmjenjeni toplinski tok u isparivačkom dijelu 2:

$$Q_{isp2} = C_1 \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_1'') \quad (59)$$

Iz čega slijedi toplinski kapacitet primarnog medija:

$$C_1 = 26061,4091 \text{ kW} / \text{K}$$

U ovom dijelu generatora pare, tzv. isparivačkom dijelu 2 također se odvija mjehuričasto vrenje, za kojega vrijedi već prethodno napisan izraz za koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_4 = 2,2 \cdot (p_2^{0,14} + 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot p_2^2)^{3,33} \cdot (\vartheta_{s,3} - \vartheta_3)^{2,33} \quad (60)$$

gdje je temperatura stijenke $\vartheta_{s,3} = 289,82^\circ\text{C}$.

Koeficijent prolaza topline:

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{r_u}{\lambda_{inco}} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{r_u}{r_v \cdot \alpha_4}} \quad (61)$$

$$k_2 = 5741,1919 \text{ W} / (\text{mK})$$

Bezdimenzijske veličine π_1 i π_2 iznose:

$$\pi_1 = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_1''}{\vartheta_1' - \vartheta_1'} \quad (62)$$

$$\pi_1 = 0,59373$$

$$\pi_2 = -\ln(1 - \pi_1) \quad (63)$$

$$\pi_2 = 0,90074$$

Iz jednadžbe (12) unutarnja površina izmjenjivača:

$$A_{0,2} = \frac{C_1 \cdot \pi_2}{k_{u2}} \quad (64)$$

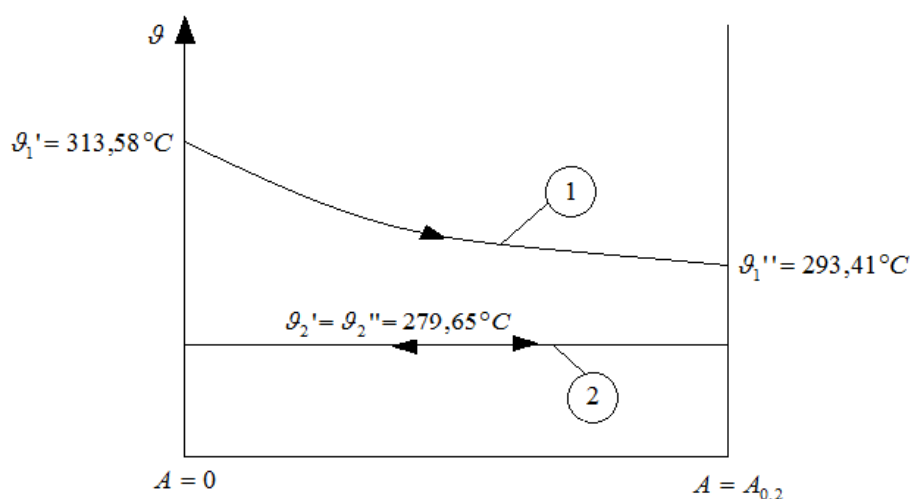
$$A_{0,2} = 4088,02 \text{ m}^2$$

Duljina isparivača iznosi:

$$L_2 = \frac{A_{0,2}}{2 \cdot r_u \cdot \pi \cdot n} \quad (65)$$

$$L_2 = 13,9172m$$

Na slici 16. su prikazane temperature struja kod isparavanja isparivačkog dijela 2.



Slika 16. Temperature struja kod isparavanja isparivačkog dijela 2

3.10. Temperatura stijenke u isparivačkom dijelu 2

Proračun temperature stijenke vršit će se iterativnim putem. Za relevantne temperature tekućine izvan i unutar cijevi uzet će se polovina duljine isparivača u isparivačkom dijelu 2 koji je proračunat u poglavlju 3.9.

Temperature na ulazu i izlazu isparivača:

$$\begin{aligned} \theta_1' &= 313,58^\circ\text{C} \\ \theta_1'' &= 293,41^\circ\text{C} \\ \theta_2' &= \theta_2'' = \theta_3 = 279,65^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Površina izmjene topline:

$$A_{0,2}^* = 2 \cdot r_u \cdot \pi \cdot n \cdot L_2 / 2 \quad (66)$$

$$A_{0,2}^* = 2047,79m^2$$

Bezdimenzijska značajka π_2^* je:

$$\pi_2^* = \frac{k_2 \cdot A_{0,2}^*}{C_1} \quad (67)$$

$$\pi_2^* = 0,451117$$

Iz toga slijedi bezdimenzijska značajka π_1^* za isparivač:

$$\pi_1^* = 1 - e^{-\pi_2^*} \quad (68)$$

$$\pi_1^* = 0,363084$$

Iz jednadžbe:

$$\pi_1^* = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_1''^*}{\vartheta_1' - \vartheta_2'} \quad (69)$$

Slijedi:

$$\vartheta_1''^* = 301,26^\circ\text{C}$$

Toplina izmjenjena konvekcijom i kondukcijom do polovine duljine isparivača:

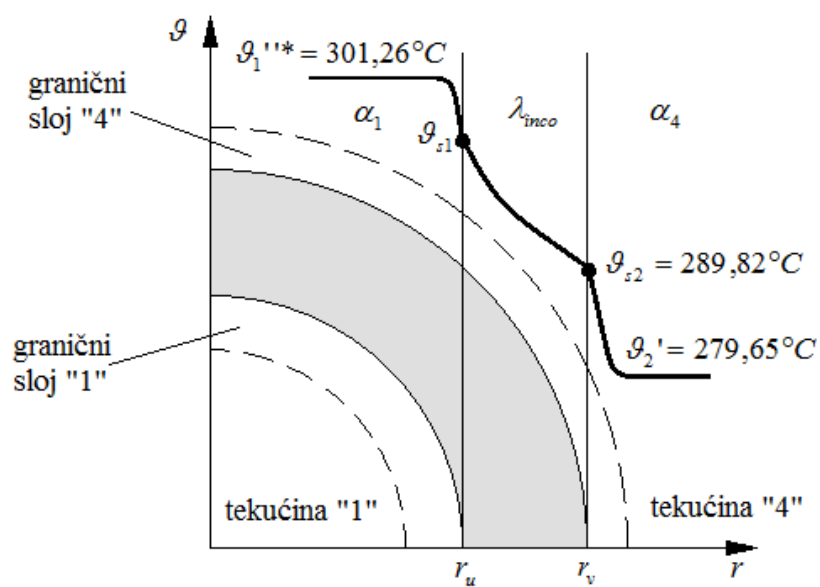
$$Q = \frac{2\pi L_2 / 2(\vartheta_1''^* - \vartheta_2')}{\frac{1}{r_u \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_{inco}} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{r_v \alpha_4}} \quad (70)$$

$$Q = 46195,65\text{W}$$

Iz jednadžbe (13) slijedi temperatura stijenke:

$$\vartheta_{s,2} = 289,82^\circ\text{C}$$

Na slici 17. je prikazano temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku za isparivački dio 2.



Slika 17. Temperaturno polje pri prolazu topline kroz cijevnu stijenku za isparivački dio 2

3.11. Ukupna izmjenjivačka površina

Unutarnja površina:

$$A_{0,uk} = A_{0,zw} + A_{0,1} + A_{0,2} \quad (71)$$

$$A_{0,uk} = 5789,8152 m^2$$

4. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je napraviti termodinamički proračun nuklearnog generatora pare te odrediti površine cijevnih snopova za izmjenu topline. Generator pare se nalazi u zaštitnoj posudi PWR nuklearne elektrane snage 690 MW, koja ima reaktor i dva primarna kruga s po jednim generatorom pare u svakom od njih. Generator pare je s U cijevima i recirkulacijom vode te ima zagrijač napojne vode. Kako se upravo takav tip nuklearnog generatora nalazi u NE Krško, dodatni su podaci uzeti upravo prema njoj pa se mogu raditi usporedbe s dobivenim podacima.

Problem je podataka poznatih za NE Krško da u različitim literaturama postoje različiti podaci. Korišteni podaci u ovom radu uzeti su iz interne skripte Fakulteta kao što je već i navedeno. Kako postoji više izvora podataka, daljnje usporedbe obuhvatit će tri izvora podataka. Usporedba dobivenih i onih podataka iz izvora prikazana je u tablici 9.

Tablica 9. Usporedba dobivenih podataka i onih iz različitih literatura

| | Vanjski promjer U cijevi, mm | Broj U cijevi | Ukupna površina prijenosa topline, m ² |
|---------------------------|---------------------------------|---------------|---|
| Dobiveni rezultati | 19 | 5500 | 5789,82 |
| Izvor 1 [5] | ~22 | 4700 | ~4800 |
| Izvor 2 [11] | 19 | 4573 | - |
| Izvor 3 [19] | 19,05 | 5428 | 7177 |

Kako se dobivena ukupna površina prijenosa topline odnosi na unutarnju površinu, nije navedeno na koju se površinu odnose podaci iz različitih drugih izvora. Upravo zbog okvirnog termodinamičkog proračuna i pojednostavljenja koja su uvedena u ovaj proračun i rad, može se reći da podaci ne odstupaju znatno, kao i da je izrađeni proračun približno točan.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

LITERATURA

- [1] http://www.world-nuclear.org/images/pwr_graph.jpg
- [2] Feretić, D.; Čavlina, N.; Debrecin, N.: Nuklearne elektrane, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- [3] Bogdan, Ž.: Termoenergetska postrojenja (interna skripta), FSB, Zagreb
- [4] Feretić, D.: Uvod u nuklearnu energetiku, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [5] Tehnička enciklopedija br. 9, Leksikografski zavod „Miroslav Krleža“, Zagreb, 1984.
- [6] <http://www.world-nuclear.org/how/npreactors.html>
- [7] <http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.2.No.2/GA/13/article.html>
- [8] <http://www.gidropress.podolsk.ru/en/projects/wwer1000.php>
- [9] http://en.wikiversity.org/wiki/Power_Generation-nuclear_Power/Part2
- [10] http://nuclearstreet.com/nuclear_power_industry_news/b/nuclear_power_news/archive/2009/04/10/nrc-posts-new-steam-generator-tube-inspection-requirements.aspx
- [11] Bogdan, Ž.: Generatori pare (interna skripta), FSB, Zagreb
- [12] <http://www.wlv.com/products/databook/db3/data/db3ch8.pdf>
- [13] Tadić, M.: Formule za određivanje koeficijenta prijelaza topline (interna skripta), FSB, Zagreb
- [14] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982.
- [15] Halasz, B.: Vježbe iz Termodinamike II, FSB, Zagreb, 2009.
- [16] Galović, A.: Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2007.
- [17] <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel600data.php>
- [18] http://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html
- [19] http://www.nek.si/hr/o_nuklearnoj_tehnologiji/tehnicki_podaci/

